

Kendali Kestabilan Kecepatan Vane Motor Pneumatik Berbasis PID

Budi Setiadi¹, Nanang Mulyono², Hari Purnama³, Hilmi Dhiya Ulhaq⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

JL. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat 40559, Indonesia

Email: budi.setiadi@polban.ac.id

Received 30 Mei 2022 / Revised 10 Juni 2022 / Accepted 18 Juni 2022

ABSTRAK

Kestabilan putaran berpengaruh terhadap kualitas hasil pembuatan cat. Penelitian ini, fokus mengidentifikasi pengendalian kestabilan kecepatan putaran pada plan vane motor pneumatik saat berganggu. Gangguan pengereman mekanik dan penurunan tekanan inlet sumber energi angin. Plan disetting berputar 250 rpm. Sistem pengendalian digunakan digital-PID (Proportional- Integral-Derivative) dengan nilai parameter K_p , K_i , K_d dari hasil analisa zeigler nichols. PID mengatur bukaan katup yang mengalirkan angin melalui plan. Umpan balik sistem kecepatan digunakan sebagai koreksi error. Sistem stabil dengan error steady state (ESS) 0,46%. Saat berganggu mekanik 5% overdamped 1,5 detik , overshoot 3,65% dan gangguan 10% overdamped 3,3 detik, overshoot 7,71%. Saat gangguan inlet 0,45 bar overdamped 3 detik, overshoot 2,54% dan gangguan inlet 1,2 bar overdamped 4,3 detik, overshoot tetap.

Kata kunci: vane motor pneumatik, PID, gangguan mekanik, gangguan inlet

ABSTRACT

The rotational stability affects the quality of the paint productions. This research focuses on identifying the control of rotational speed stability on a pneumatic motor plan vane when it is disturbed. Disturbance of mechanical braking and a decrease in the inlet pressure of the wind energy source. The plan is set to rotate at 250 rpm. The control system used digital-PID (Proportional-Integral-Derivative) with parameter values K_p , K_i , K_d from the results of Zeigler Nichols analysis. PID regulates valve openings that allow air to flow through the plan. Speed system feedback is used as error correction. The system is stable with a steady state error (ESS) 0.46%. When the mechanical disturbance is 5% overdamped for 1.5 seconds, overshoot is 3.65% and 10% is overdamped for 3.3 seconds, overshoot is 7.71%. When the inlet disturbance is 0.45 bar overdamped for 3 seconds, the overshoot is 2.54% and the inlet fault is 1.2 bar overdamped for 4.3 seconds, the overshoot remains the same.

Keywords: pneumatic vane motor, PID, mechanical disturbance, inlet disturbance

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pneumatik semakin berkembang dan banyak digunakan salah satunya pada industri pembuatan cat. Pada pabrik pembuatan cat, *vane* motor pneumatik digunakan karena faktor keamanan dari arus kejut listrik serta faktor kebersihan [1]. Faktor lain yang perlu diperhatikan untuk menghasilkan kualitas standar ASTM D 1210-96 adalah kestabilan kecepatan dan durasi waktu pengadukan pada saat volume beban berbeda-beda [2]. Sifat dari sistem pneumatik menggunakan sumber energi tekanan angin yang dinamis mengikuti bentuk ruang memungkinkan menimbulkan masalah. Kebocoran pada saluran selang distribusi maupun sumber energi angin kompresor (*surge*) akan langsung berdampak pada hilangnya torsi pada plan yang dikendalikan [3], [4]. Mengacu penjelasan dari permasalahan tersebut, maka dibutuhkan pengendalian kestabilan kecepatan *vane* motor pneumatik yang handal, baik dari gangguan perubahan beban maupun kebocoran sumber energi angin (*inlet*). Metode kendali yang digunakan pada penelitian ini adalah metode PID (*Proportional-Integral-Derivative*) dikarenakan handal dan masih banyak digunakan pada industri [5].

Penelitian terkait pengendalian plan pneumatik diantaranya, *Design of Air Motor Speed Control System for Small Scale Compressed Air Energy Storage Using Fuzzy Logic*. Metode pengendalian *fuzzy* digunakan untuk mengendalikan putaran motor pneumatik (pengganti turbin) yang terkopel dengan generator listrik. Hasil dari pengujian motor pneumatik dapat berputar sesuai *setpoint* yang diharapkan dan efisiensi pengisian lebih baik dari turbin air untuk setiap perubahan beban listrik di generator [6]. Terkait pengolahan data *programmable logic controller* (PLC) untuk pengendalian plan pneumatik [7], [8]. PLC difungsikan untuk mengatur bukaan katup pneumatik melalui *driver inverter*. Hasil pengukuran konsisten dibandingkan dengan simulasi *image simulation* [7]. PLC mengatur kecepatan kestabilan putaran motor kompresor melalui *variable frequency driver* (VFD). Hasil dari pengujian penggunaan PLC untuk pengaturan VFD dapat mengendalikan dan menghemat daya > 50% dengan frekuensi 50 Hz [8]. Terkait pengolahan data berbasis mikrokontroler untuk pengendalian plan pneumatik [9]- [11]. Metode pengendalian *adaptive dynamic sliding-mode control* (ADSMC) digunakan untuk mengatur bukaan katup proporsional. Bukaan katup mengatur jumlah aliran angin yang melalui motor pneumatik. Hasil pengujian menggunakan servo sebagai beban motor pneumatik, sistem dapat melakukan *tracking* sesuai dengan target [9]. Metode pengendalian *fuzzy* digunakan untuk mengatur bukaan katup proporsional [10]- [11]. Bukaan katup mengatur jumlah aliran angin yang melalui silinder kerja ganda [10] maupun motor pneumatik [11], berdampak pada perubahan sudut *tracking* solar panel. Hasil pengujian sistem dapat mempertahankan posisi sesuai *setpoint* dengan ESS 1,6% dan *overshoot* 5,3% [10]. Hasil pengujian sistem dapat mempertahankan kestabilan kecepatan sesuai *setpoint* dengan ESS 5,26% [11].

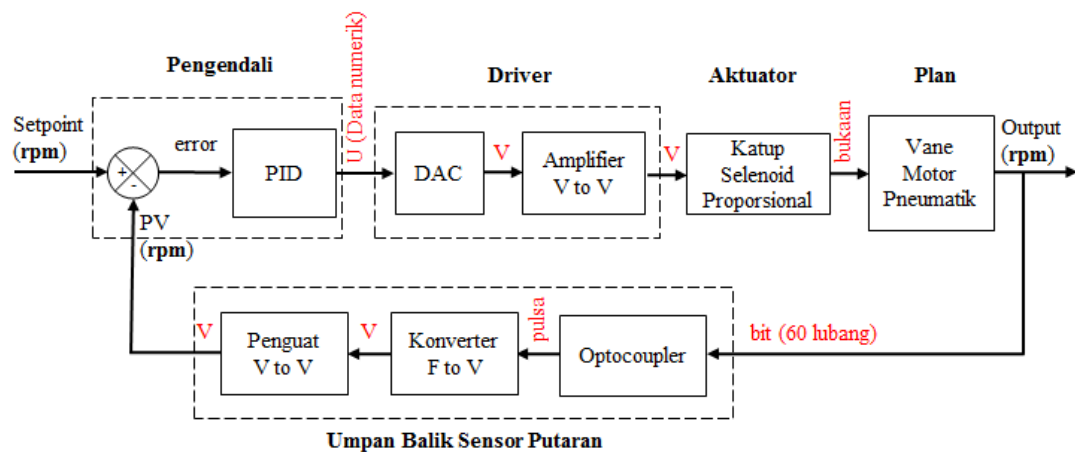
Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan respon dinamik putaran *vane* motor pneumatik dengan ESS < 5%. *Setpoint* disetting 250 rpm, pada saat sistem diberi gangguan mekanik 5%, 10% serta gangguan *inlet* kebocoran sumber energi angin (kompresor) 0,45 bar dan 1,2 bar. Metode pengendalian klasik yang digunakan digital-PID. Penentuan nilai parameter K_p, K_i, K_d untuk PID menggunakan analisis *zeigler nichols*. Pengendali menggunakan mikrokontroler, diharapkan dapat menghasilkan ESS lebih baik dari penelitian sebelumnya [11].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Perangkat keras pengendalian kestabilan kecepatan pada penelitian ini dibagi menjadi 2, yaitu perangkat keras elektronik dan mekanik pneumatik. Sedangkan pengolahan data untuk aksi pengendalian *vane* motor pneumatik dan umpan balik kecepatan menggunakan algoritma PID.

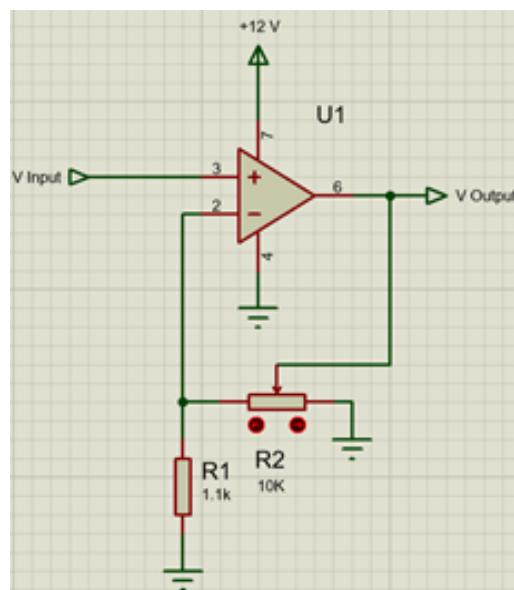
2.1 Perangkat Keras Elektronik

Perangkat keras elektronik terdiri dari blok pengendali, *driver*, aktuator, plan, dan umpan balik. Detail blok diagram sistem kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat Keras Dan Blok Diagram Sistem Kendali

Pengendali menggunakan modul mikrokontroler *platform* Arduino. *Digital to analog converter* (DAC) menggunakan modul tipe MCP 4725, masukan I2C dan keluaran tegangan analog 0-5 Vdc dengan resolusi 10-bit. *Amplifier* menggunakan modul standar industri dengan tipe VEA250, masukan tegangan analog 0-5 Vdc dan keluaran tegangan analog 0-24 Vdc. Aktuator hibrid (masukan listrik keluaran mekanik) menggunakan katup proporsional, masukan tegangan 0-24 Vdc dan keluaran bukaan 0-100% diameter 6mm. Optocoupler hibrid (gerak listrik) menggunakan modul tipe HC-020K, masukan gerak dan keluaran pulsa tegangan (0 Vdc dan 5Vdc). Konverter frekuensi ke tegangan menggunakan modul, masukan pulsa tegangan (0 Vdc dan 5 Vdc, 1-10KHz) dan keluaran tegangan 0-10 Vdc. Penguat dirangkai dari komponen IC Op-Amp tipe LM324, resistor dan *trimpot* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Penguat V to V

Detail spesifikasi komponen elektronik yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi perangkat keras elektronik

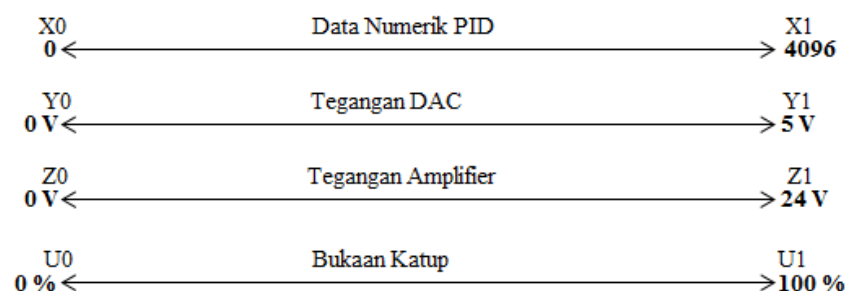
No	Perangkat	Spesifikasi
1	Mikrokontroler	Arduino Uno berbasis ATmega328; PWM; serial; 10-bit ADC
2	MCP 4725	DAC 10-bit; I2C; 5Vdc
3	VEA250	Masukan tegangan 0 s/d 5Vdc, arus 4 s/d 20mA; keluaran tegangan 0 s/d 24Vdc; <i>power</i> disipasi 4watt, <i>Power amplifier</i>
4	F to V	masukan single/double pulsa; 0 s/d 10 KHz; keluaran 0 s/d 10Vdc
5	HC-020K	<i>Optocoupler</i> ; 5Vdc
6	LM324	<i>Single supply</i> 12Vdc; <i>op-amp</i>
7	Resistor	¼ watt ; 1 KΩ;
8	Resistor <i>Variable</i>	<i>Multiturn</i> ; 100 KΩ; ¼ watt
9	<i>Power Supply</i>	5Vdc/1A; 12Vdc/1A; 24Vdc/2A

Tahapan proses pengendalian sistem kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Mikrokontroler berfungsi sebagai pengolah data digital dan algoritma PID. Mikrokontroler menerima masukan *setpoint* dan umpan balik sensor kecepatan. *Setpoint* dalam bentuk nilai numerik tertanam langsung di mikrokontroler berupa deklarasi variabel perangkat lunak. Umpan balik berupa tegangan hasil konversi dari kecepatan dibaca mikrokontroler melalui fasilitas *analog to digital converterr* (ADC) dan selanjutnya dikonversi menjadi bentuk nilai numerik. Kedua nilai masukan numerik tersebut dibandingkan menjadi bentuk koreksi *error* untuk algoritma PID. Nilai koreksi *error* merupakan fungsi waktu seperti didefinisikan seperti persamaan (1).

$$error(t)=SP(t)-PV(t) \quad (1)$$

Ket : SP adalah *setpoint*
 : PV (*present value*) adalah umpan balik
 : *error* adalah koreksi sistem merupakan selisih antara SP dengan PV

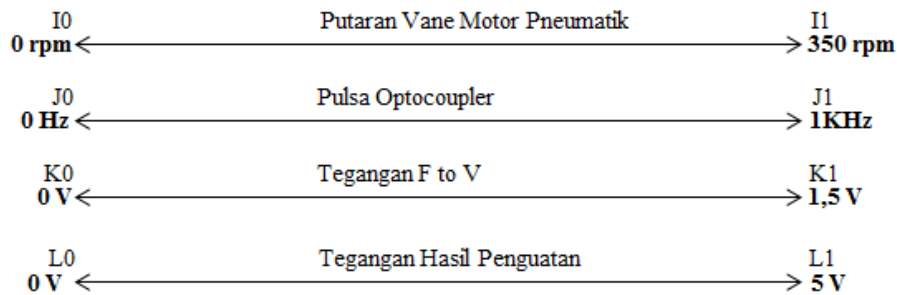
Hasil pengolahan PID berupa data numerik 10-bit dengan rentang nilai 0-4096. Selanjutnya data numerik tersebut dikirim ke modul DAC melalui komunikasi serial sinkron I2C (*sda*, *scl*) dan diterjemahkan menjadi keluaran tegangan analog 0-5 Vdc. Tegangan keluaran DAC dikonversi menjadi tegangan analog 0-24 Vdc dengan penambahan penguat arus melalui modul VEA250. Keluaran tegangan analog VEA250 merupakan *trigger* untuk katup proporsional. Besar kecil bukaan katup bergantung sinyal dari VEA250. Detail hubungan interpolasi keluaran PID driver dan aktuator seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Interpolasi Data Numerik, Driver dan Aktuator

Katup proporsional merupakan komponen hibrid. Keluaran katup dikopel dengan selang ke sumber energi angin (kompresor) dan *vane* motor pneumatik. Cepat lambat putaran *vane* motor pneumatik bergantung volume aliran udara yang diatur oleh katup proporsional. Sebagai koreksi untuk algoritma PID, kecepatan *vane* motor pneumatik di sensor menggunakan *optocoupler* yang terkopel dengan piringan (desain 60 lubang). Setiap putaran akan menghasilkan 1 pulsa frekuensi. Keluaran pulsa frekuensi dikonversi modul F to V menjadi tegangan analog 0-1,5 Vdc. Keluaran tegangan F to V

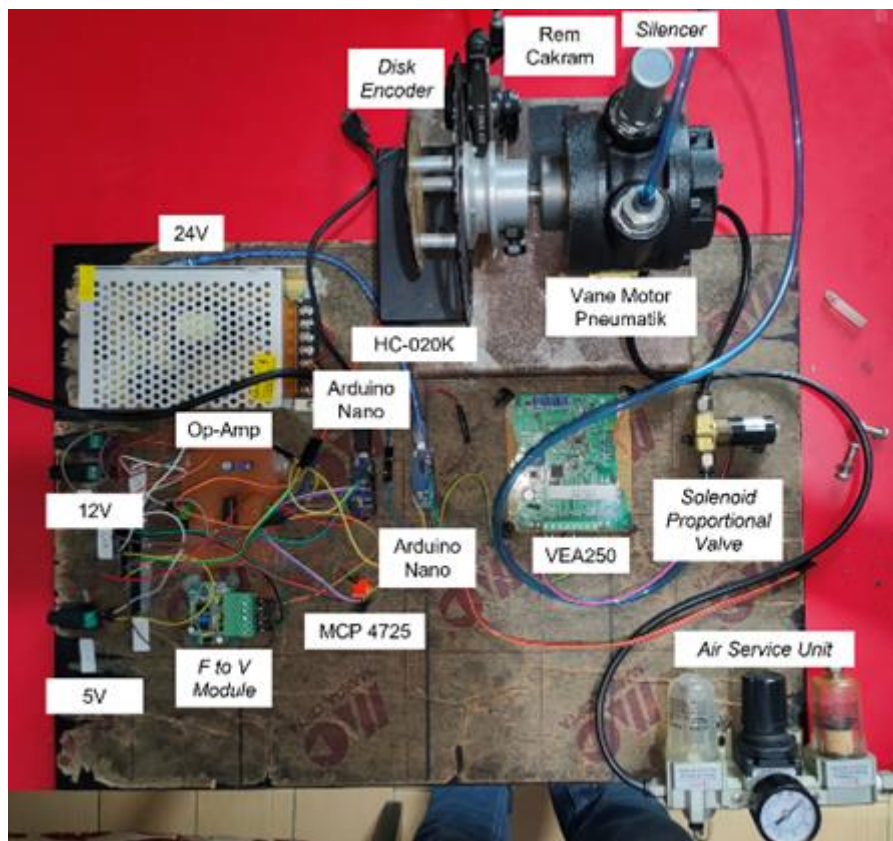
dikuatkan 3,5 kali melalui rangkaian *op-amp*, sehingga rentang keluaran tegangan menjadi 0-5 Vdc. Tegangan keluaran penguat merupakan umpan balik mikrokontroler. Detail hubungan interpolasi putaran dan umpan balik sensor kecepatan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Interpolasi Putaran Dan Umpan Balik Sensor Kecepatan

- Ket : Rentang nilai rpm interpolasi sumbu I merupakan hasil pengujian pada saat katup terbuka 100% dan tekanan 8 bar
: Rentang nilai frekuensi interpolasi sumbu K merupakan hasil pengujian pada saat putaran *vane* motor pneumatik maksimum

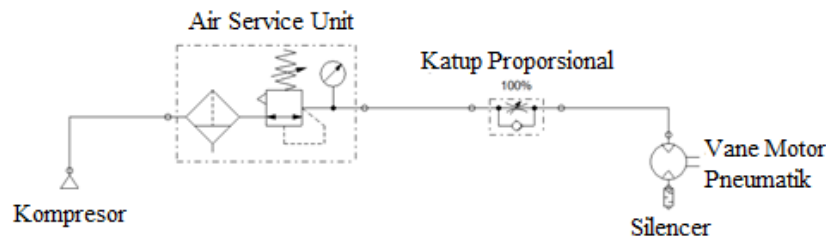
Realisasi sistem kestabilan putaran *vane* motor pneumatik seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Aktuator dan plan yang digunakan merupakan komponen standar industri, sedangkan kontrolernya menggunakan standar laboratorium pendidikan (mikrokontroler).



Gambar 5. Realisasi Sistem

2.2 Perangkat Keras Mekanik Pneumatik

Perangkat keras mekanik pneumatik terdiri dari kompresor, *air service unit*, katup proporsional, *vane motor pneumatik* dan *silencer*. Detail blok diagram sistem mekanik pneumatik seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Blok Diagram Sistem Mekanik Pneumatik

Supply aliran angin ke seluruh selang dan perangkat pneumatik bersumber dari kompresor. Dikarenakan angin yang dihasilkan kompresor mengandung uap air, maka dilakukan pemisahan antara partikel angin dan air (*lubricant*) pada komponen *air service unit*. *Air service unit* berfungsi juga mengatur tekanan angin serta melakukan pelumasan ke perangkat pneumatik. Sumber angin dari *air service unit* disalurkan ke *vane motor pneumatik* melalui pengaturan katup proporsional. Untuk menghindari kotoran dari luar masuk ke saluran angin, maka ujung sistem dipasang saringan sekaligus peredam suara (*silencer*). Detail spesifikasi komponen mekanik pneumatik yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Perangkat Keras Mekanik

No	Perangkat	Spesifikasi
1	Kompresor	<i>Silent</i> ; elektrik; ¾ Hp
2	<i>Air Service Unit</i>	Lubrikan; regulator; pelumasan; mak 10 Bar
3	Katup Proporsional	Satu arah; 1/8; 0,7 Mpa; analog 24 Vdc; 4 watt; selang 6mm
4	Motor Pneumatik	2,8 Hp; 7 Bar; 4000 rpm
5	<i>Silincer</i>	1/8

2.3 Algoritma PID

Kendali PID merupakan kendali yang digunakan untuk menentukan kepresisian suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Respon sistem dipengaruhi oleh parameter-parameter dari faktor pengali, integral dan derivative secara kontinu. Adapun persamaan umum dari aksi kendali PID sebagai berikut:

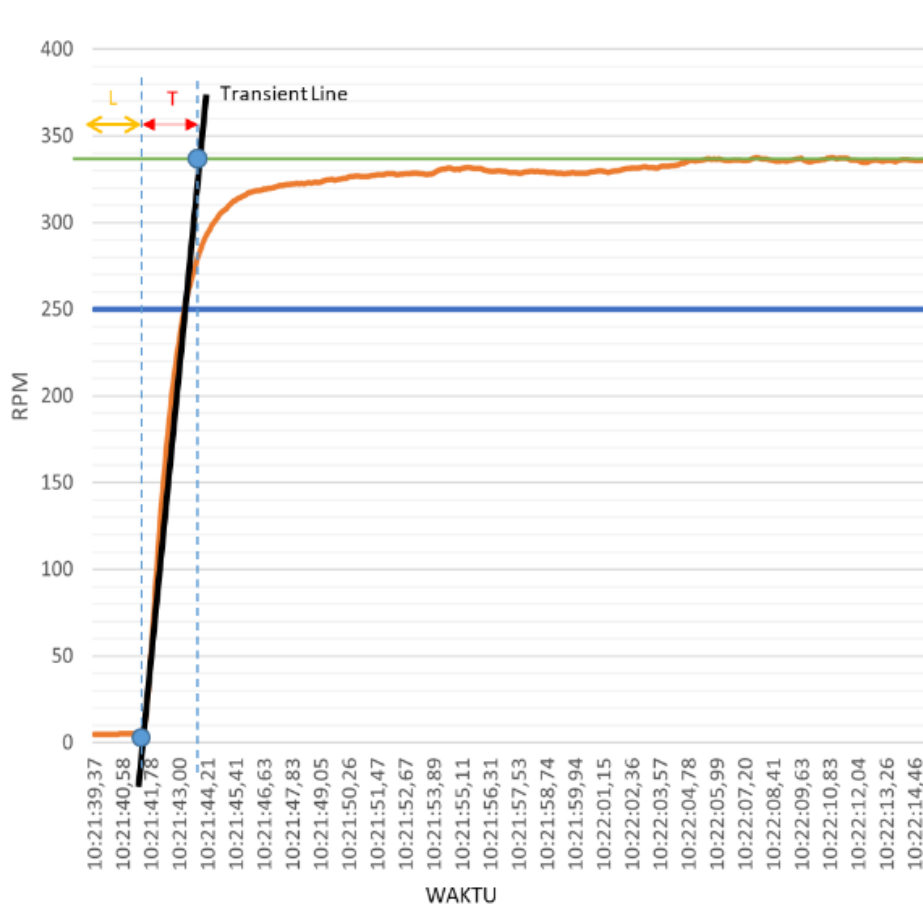
$$u(t) = K_p \text{error}(t) + \frac{K_p}{T_i} \int \text{error}(t) dt + K_p T_d \frac{d(\text{error}[t])}{dt} \quad (2)$$

Atau

$$u(t) = K_p \text{error}(t) + K_i \int \text{error}(t) dt + K_d \frac{d(\text{error}[t])}{dt} \quad (3)$$

Ket : u adalah penjumlahan keluaran nilai hasil algoritma PID
 : K_p adalah nilai parameter untuk algoritma P
 : K_i adalah nilai parameter untuk algoritma I
 : K_d adalah nilai parameter untuk algoritma D

Penentuan nilai parameter dilakukan dengan analisa zeigler nichols. Langkah pertama dalam melakukan *tunning* dimulai dari mencari analisa grafik respon mula sistem kendali *loop* terbuka. Pada saat plan *vane motor pneumatik* diberi masukan aliran angin bertekanan 8 bar dan bukaan katup proporsional 100% putaran mencapai 340 rpm. Detail grafik respon mula *vane motor pneumatik* dengan metode *loop* terbuka seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Respon Mula Plan Vane Motor Pneumatik Metode Loop Terbuka

Tarik garis lurus (hitam) tepat yang paling banyak bersinggungan dengan grafik kurva respon keluaran vane motor pneumatik (kuning), didapat *delay time* (L) dan *rise time* (T) sebagai berikut:

$$L = 41,55 - 39,37 = 2,18 \text{ s}$$

$$T = 43,73 - 41,55 = 2,18 \text{ s}$$

Selanjutnya nilai L dan T dimasukkan ke persamaan *zeigler nichols 1* (*loop* terbuka) untuk mendapatkan nilai parameter K_p K_i K_d , seperti ditunjukkan pada persamaan (4), (5), dan (6). Setelah mengetahui nilai L dan T, selanjutnya mencari nilai K_p , T_i dan T_d .

$$K_p = 1,2 \times \frac{T}{L} \quad (4)$$

$$K_p = 1,2 \times \frac{2,18}{2,18}$$

$$K_p = 1,2$$

$$T_i = 2 \times L \quad (5)$$

$$T_i = 2 \times 2,18$$

$$T_i = 4,36$$

$$T_d = 0,5 \times L \quad (6)$$

$$T_d = 0,5 \times 2,18$$

$$T_d = 1,09$$

Ket : $K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0,275$

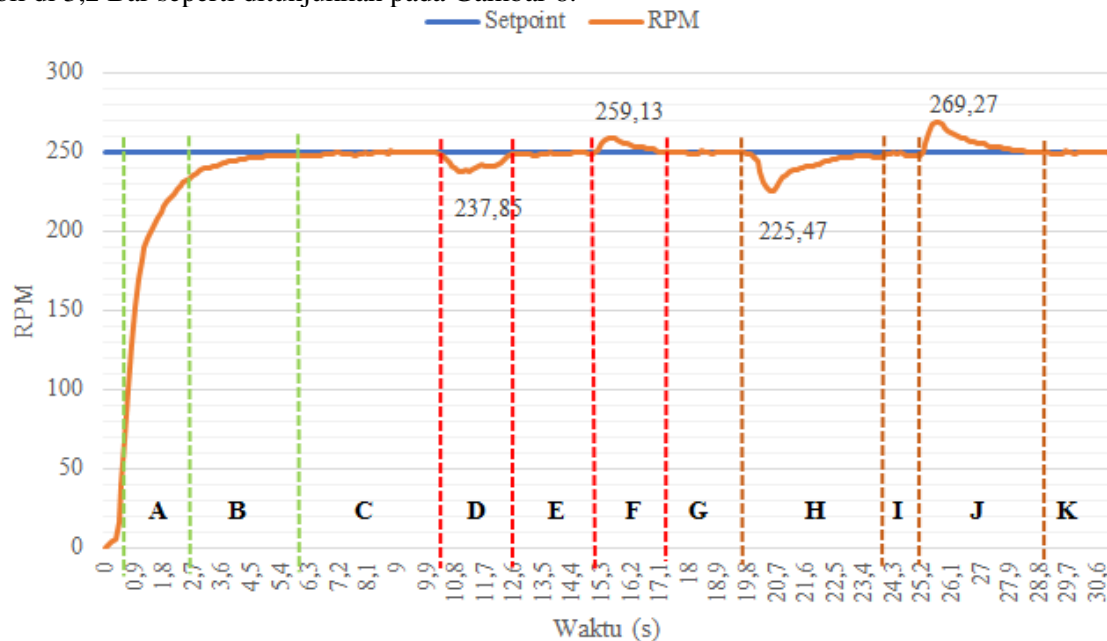
: $K_d = K_p \times T_d = 1,31$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perangkat keras dan lunak sistem hasil penelitian dilakukan pengujian secara bersamaan untuk melihat grafik respon dinamik. Parameter respon dinamik yang diamati meliputi (*rise time*, *time settling*, *error steady state*, *overshoot*, *overdamped*). Pengujian dilakukan menjadi 2 tahap, yaitu dengan gangguan pengereman, dan gangguan sumber energi aliran angin dari *inlet* sistem ke *vane* motor pneumatik. Adapun *setpoint* putaran sistem ditetapkan sebesar 250 rpm.

3.1 Pengujian Dengan Gangguan Pengereman

Pengujian dengan gangguan pengereman dilakukan secara mekanik terhadap putaran *vane* motor pneumatik. Putaran *vane* motor pneumatik terkopel dengan *disk brake* dan rem. Besarnya gangguan pengereman pada penelitian ini dibatasi pada 5% dan 10% (skala perbandingan *setpoint* terhadap respon putaran rpm). Grafik hasil pengujian dengan gangguan pengereman dengan tekanan sumber energi angin stabil di 3,2 Bar seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Respon Dinamik Dengan Gangguan Pengereman

Daerah A, B, dan C menunjukkan kinerja sistem sebelum diberikan gangguan. Nilai *rise time* sistem ditunjukkan pada daerah A, dimana mulai dari 0% sampai 90% pada saat sistem tanpa berbeban diperlukan waktu 2,7 detik. Daerah B menunjukkan bahwa sistem dapat stabil dengan *time settling* di detik ke 6. Daerah C menunjukkan *overshoot* 0% dan ESS 0,46% seperti ditunjukkan pada proses perhitungan persamaan (7).

$$\%ESS = \frac{|Rerata\ Kecepatan\ Steady - Setpoint|}{Setpoint} \times 100\% \quad (7)$$

$$\%ESS = \frac{|251,145 - 250|}{250} \times 100\%$$

$$\%ESS = 0,46\%$$

Daerah D menunjukkan sistem pada saat diberi gangguan 5% putaran turun menjadi 237,85 rpm (detik ke 11,1) dan dapat memperbaiki untuk mencapai kondisi ESS dengan *overdamped* 1,5 detik (detik ke 12,6). Daerah E menunjukkan sistem dapat mempertahankan kondisi ESS pada saat bergangguan 5%. Daerah F menunjukkan sesaat setelah gangguan 5% hilang, terlihat adanya *overshoot* (Mp) 3,65% seperti ditunjukkan pada proses perhitungan persamaan (8) dan dapat kembali ke kondisi ESS dengan *overdamped* 1,2 detik (detik ke 17,2). Daerah G menunjukkan kondisi sama seperti daerah C.

$$\%Mp = \frac{|Rerata\ puncak - Setpoint|}{Setpoint} \times 100\% \quad (8)$$

$$\%Mp = \frac{|259,13 - 250|}{250} \times 100\%$$

$$\%Mp = 3,65\%$$

Daerah H menunjukkan sistem pada saat diberi gangguan 10% putaran turun menjadi 225,47 rpm (detik ke 20,7) dan dapat memperbaiki untuk mencapai kondisi ESS dengan *overdamped* 3,3 detik (detik ke 24). Daerah I menunjukkan sistem dapat mempertahankan kondisi ESS pada saat bergangguan 10%. Daerah J menunjukkan sesaat setelah gangguan 10% hilang, terlihat adanya *overshoot* (Mp) 7,71% seperti ditunjukkan pada proses perhitungan persamaan (9) dan dapat kembali ke kondisi ESS dengan *overdamped* 2,7 detik (detik ke 28,8). Daerah G menunjukkan kondisi sama seperti daerah C dan G.

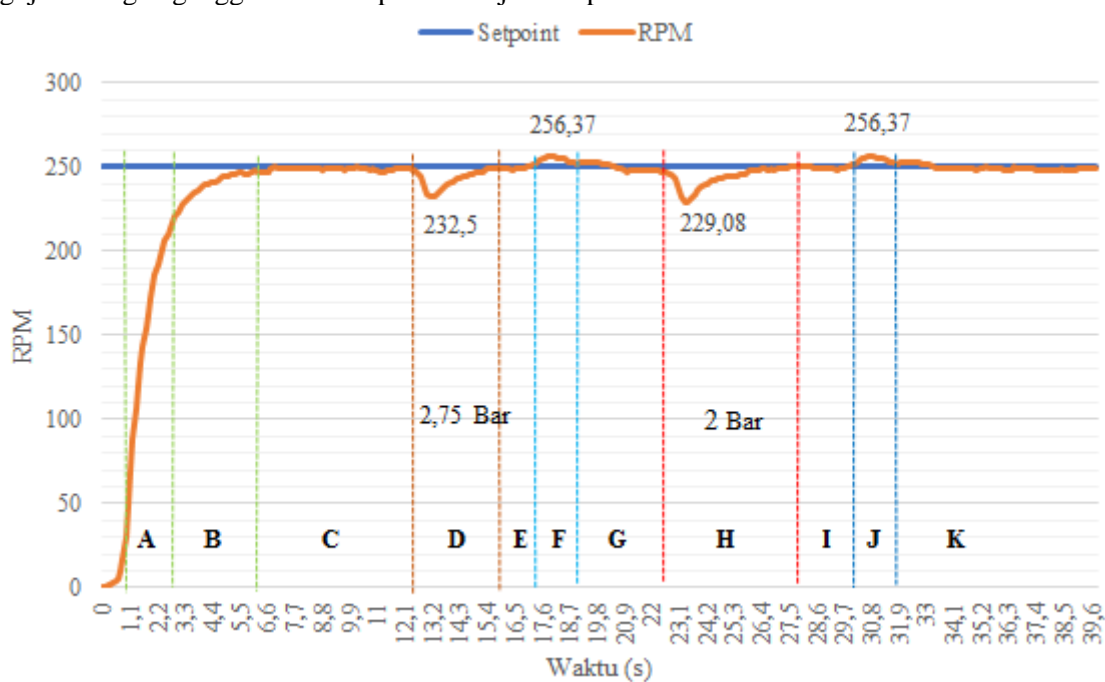
$$\%Mp = \frac{|Rerata\ Puncak - Setpoint|}{Setpoint} \times 100\% \quad (9)$$

$$\%Mp = \frac{|269,27 - 250|}{250} \times 100\%$$

$$\%Mp = 7,71\%$$

3.2 Pengujian Dengan Gangguan Inlet

Pengujian dengan gangguan *inlet* dari sumber energi angin (kompresor) dilakukan manual dengan menurunkan tekanan udara yang mengalir ke sistem melalui regulator. Besarnya gangguan penurunan tekanan *inlet* pada penelitian ini dibatasi pada 0,45 bar dan 1,2 bar dari *setpoint* 3,2 bar. Grafik hasil pengujian dengan gangguan *inlet* seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Respon Dinamik Dengan Gangguan Inlet

Daerah A, B, dan C menunjukkan kinerja sistem sebelum diberikan gangguan, sama seperti hasil pengujian gangguan secara mekanik. Daerah D menunjukkan sistem pada saat diberi gangguan penurunan tekanan 0,45 bar putaran turun menjadi 232,52 rpm (detik ke 13) dan dapat memperbaiki untuk mencapai kondisi ESS dengan *overdamped* 3 detik (detik ke 16). Daerah E menunjukkan sistem

dapat mempertahankan kondisi ESS pada saat gangguan penurunan tekanan 0,45 bar. Daerah F menunjukkan sesaat setelah gangguan penurunan tekanan 0,45 bar hilang (*inlet* 3,2 bar), terlihat adanya *overshoot* 2,54% seperti ditunjukkan pada proses perhitungan persamaan (10) dan dapat kembali ke kondisi ESS dengan *overdamped* 1,1 detik (detik ke 19). Daerah G menunjukkan kondisi sama seperti daerah C.

$$\%Mp = \frac{|Rerata\ puncak - Setpoint|}{Setpoint} \times 100\% \quad (10)$$

$$\%Mp = \frac{|256,37 - 250|}{250} \times 100\%$$

$$\%Mp = 2,54\%$$

Daerah H menunjukkan sistem pada saat diberi gangguan penurunan tekanan 1,2 bar putaran turun menjadi 229,08 rpm (detik ke 23,1) dan dapat memperbaiki untuk mencapai kondisi ESS dengan *overdamped* 4,3 detik (detik ke 27,5). Daerah I menunjukan sistem dapat mempertahankan kondisi ESS pada saat gangguan penurunan tekanan 1,2 bar. Daerah J menunjukkan sesaat setelah gangguan penurunan tekanan 1,2 bar hilang (*inlet* 3,2 bar), terlihat adanya *overshoot* sama seperti gangguan 0,45 bar dan dapat kembali ke kondisi ESS dengan *overdamped* 1 detik (detik ke 31,9). Daerah K menunjukkan kondisi sama seperti daerah C dan G.

4. KESIMPULAN

Algoritma PID dengan nilai parameter hasil pendekatan *zeigler nichols* menghasilkan hasil pengujian sesuai target dan kokoh terhadap gangguan. Sistem dapat mempertahankan *setpoint* pada saat diberi gangguan mekanik dan gangguan *inlet* sumber energi angin. Sistem stabil dengan ESS 0,46%. Pada saat diberi gangguan mekanik 5% menghasilkan *overdamped* 1,5 detik dan *overshoot* 3,65%. Pada saat diberi gangguan mekanik 10% menghasilkan *overdamped* 3,3 detik dan *overshoot* 7,71%. Pada saat diberi gangguan *inlet* 0,45 bar menghasilkan *overdamped* 3 detik dan *overshoot* 2,54%. Dan saat diberi gangguan *inlet* 1,2 bar menghasilkan *overdamped* 4,3 detik dengan *overshoot* tetap. Pengembangan lanjutan menggunakan metode fuzzy-PID, Kalman Filter untuk menghasilkan respon dinamik yang lebih baik, cepat, dan kokoh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Bandung atas pendanaan melalui skema Penelitian Mandiri dengan SK Nomor B/114.78/PL1.R7/PG.00.03/2022.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Rudiansyah, "Pengembangan Alat Pengajaran Kontrol Elektropneumatik Portabel Berstandar Industri," no. September, 2019.
- [2] P. Waktu et al., "COLORANT DARI TITANIUM DIOKSIDA Bahan dan Alat," Ratnawati, Yoshi Al, pp. 61–65, 2018.
- [3] A. Sumadi, D. H. R. Saputra, and J. Jamaaluddin, "Informasi Gangguan Tekanan Udara Pada Peralatan Mesin Kompresor Dengan Komunikasi Sms Berbasis Arduino," J. Elektron. List. Telekomun. Komputer, Inform. Sist. Kontrol, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2020, doi: 10.30649/j-eltrik.v2i1.45.
- [4] H. Imani, H. Malekizade, H. A. Bagal, and H. Hosseinzadeh, "Surge explicit nonlinear model predictive control using extended greitzer model for a ccv supported compressor," *Automatika*, vol. 59, no. 1, pp. 43–50, 2018, doi: 10.1080/00051144.2018.1498204.
- [5] S. W. Jadmiko, S. Yahya, S. Sudrajat, and F. Azizah, "Komparasi Kinerja Kendali PID dan Logika Fuzzy pada Simulator Plant Orde Dua," *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 5, no. 2, p. 237, 2020, doi: 10.31544/jtera.v5.i2.2020.237-246.

- [6] Widjonarko, R. Soenoko, S. Wahyudi, and E. Siswanto, "Design of Air Motor Speed Control System for Small Scale Compressed Air Energy Storage Using Fuzzy Logic," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012025.
- [7] W. J. Zhang, F. Zhang, J. Zhang, J. Zhang, and J. Zhang, "Application of PLC in Pneumatic Measurement Control System," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 452, no. 4, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/452/4/042074.
- [8] E. M. A. Elsadek, H. Ashour, R. A. Refaat, and M. Mostafa, "Efficiency Improvement and Saving Energy within," *2019 Int. Conf. Innov. Trends Comput. Eng.*, no. February, pp. 2–4, 2019.
- [9] S. Y. Chen and S. S. Gong, "Speed tracking control of pneumatic motor servo systems using observation-based adaptive dynamic sliding-mode control," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 94, no. 129, pp. 111–128, 2017, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.02.025.
- [10] B. Setiadi, "Solar Tracker Elektro-Pneumatik Berbasis Kendali Fuzzy," *J. Rekayasa Hijau*, vol. 4, no. 3, pp. 179–190, 2020, doi: 10.26760/jrh.v4i3.179-190.
- [11] F. Z. Raihan, B. Setiadi, H. Purnama, V. A. Wijayakusuma, and K. Kunci, "Kendali Kecepatan Vane Motor Pneumatik Berbasis Kendali Fuzzy," pp. 4–5, 2021.